

Le déclenchement de laves torrentielles, un phénomène complexe étudié à l'aune des crues survenues dans les Alpes occidentales en 2006

Eric Bardou & Guillaume Favre¹

Bull. Murithienne 126/2008 : 19-28 (2009)

Lors de l'été 2006, une série de crue impliquant un fort transport de sédiments a touché les Alpes suisses. Plusieurs de ces événements ont touché des bassins versants de haute montagne, où des zones de pergélisol ont parfois joué un rôle prépondérant. Si la pluie (intensité et lame totale) reste souvent l'explication la plus pertinente, certains événements se sont produits sans précipitations (effet de la fonte). Sur la base d'un inventaire, le plus exhaustif possible, une analyse des environnements de départ (typologie et exposition) et de la température a été menée. Une analyse un peu plus poussée du lien potentiel entre la fonte (par ex. du pergélisol) et le déclenchement des crues torrentielles montre quels paramètres, reliés au calcul des degrés-jours cumulés, pourraient permettre d'affiner l'estimation des prédispositions des bassins versants. Pour comparaison, ces paramètres ont aussi été calculés pour les années suivantes. Seul l'augmentation de la base statistique permettra d'affiner les capacités de prévision de tels événements, qui ont coûté, en 2006, la vie à trois personnes en Suisse.

Mots clés

intempéries,
lave torrentielle, charriage,
analyse d'événement,
changement climatique

Murgänge, ein komplexes Problem, studiert nach den Hochwasserkatastrophen 2006 in den Westalpen. – Im Sommer 2006 haben eine Reihe von Hochwasserfluten die Schweizeralpen betroffen. Mehrere der Ereignisse hatten ihren Ursprung in Einzugsgebieten des Hochgebirges, wo Permafrostzonen mitunter eine ausschlaggebende Rolle spielten. Wenn der Regen (Intensität und totale Wassermenge) oft wohl die treffendste Erklärung liefert, sind trotzdem gewisse Murgänge auch ohne Regenfälle aufgetreten. (Wirkung des Auftauens). Auf der Basis eines, so ausführlich wie möglich erstellten Inventars wurde eine Analyse der betroffenen Standorte (Typologie und Exposition) und der jeweils herrschenden Temperaturen durchgeführt. Eine vertiefte Analyse der möglichen Verbindungen zwischen Auftauen (z. B. Permafrost) und dem Ausbruch der Murgänge wurde durchgeführt. Sie wollte aufzeigen, welche Parameter, berechnet mit der Methode der akkumulierten Grad-Tage, die Abschätzung der Prädisposition eines Einzugsgebietes verbessern könnten. Zum Vergleich wurden dieselben Parameter auch für die folgenden Jahre berechnet. Nur die Erhöhung der statistischen Daten wird erlauben, die Prognose dieser Katastrophen, die 2006 3 Menschenleben gekostet haben, zu verbessern und zu verfeinern.

Schlüsselwörter

Umwetter, Murgang,
Geschiebetransport,
Ereignis Analyse, Klima
Wandel

¹ Centre de Recherche sur
l'Environnement ALPin
(CREALP), Sion. Contact :
eric.bardou@crealp.vs.ch

INTRODUCTION

En région de montagne les crues sont indissociables des phénomènes de transfert de sédiments qui recouvrent aussi bien les événements de charriage que des laves torrentielles. Dans les deux cas il s'agit d'un mélange d'eau et de sédiments de toutes tailles. Si on distingue ces deux phénomènes en fonction du mouvement relatif des différents éléments du mélange, c'est que les dégâts potentiels diffèrent fortement entre ces deux phénomènes. Cependant, par souci de simplicité, les deux phénomènes seront étudiés globalement dans cet article. Cela se justifie car l'accent est porté sur les processus de déclenchement qui sont, eux, dans les torrents, grosso modo similaires pour le charriage et les laves torrentielles.

Durant l'année 2006 plusieurs crues ont pu retenir l'attention du grand public. C'est la première fois, à notre connaissance, que la presse a employé le terme de lave torrentielle (Le Matin du 24 juillet 2006). Cette année là, les intempéries ont fait en Suisse trois victimes et d'importants dégâts économiques (par exemple: l'ensablement de prises d'eau d'ouvrages hydroélectriques). Probablement plus d'une cinquantaine d'événements de transfert de sédiments se sont produits dans le pays. Une analyse détaillée des crues et du déroulement météorologique de cette année a aussi permis aux spécialistes de faire un pas de plus dans la quantification des paramètres influençant les crues torrentielles, dont certains sont peut être en lien avec le réchauffement climatique.

En effet l'année 2006 a été très chaude. Dans plusieurs cas, les crues étaient liées aux zones périglaciaires en Valais, comme également dans les Grisons et dans l'Oberland. Dans le contexte d'un climat changeant, l'apparition de crues en lien avec les zones de pergélisol, zones où la fonte génère de l'eau et des sédiments, soulève inmanquablement des questions. Bien que l'apparition de crues torrentielles à l'aval de zones de pergélisol potentiel ne soit pas un phénomène nouveau leur nombre durant l'été 2006 mérite d'être analysé plus en détail.

Nous nous proposons dans un premier temps de replacer les crues de l'été 2006 dans le contexte hydrologique et sédimentaire général. Nous décrirons, les événements de crues antérieurs qui ont pu servir à préparer les crues torrentielles de l'été, ainsi que le déroulement climatique de l'été lui même. Ensuite, nous analyserons la distribution spatiale et temporelle des événements. Sur cette base nous tenterons de faire ressortir des éléments nécessaires à améliorer notre capacité de prévision de ces phénomènes.

Contexte climatique et dynamique sédimentaire

Les points marquants

L'été 2006 a été marqué par le fait que la plupart des phénomènes de transfert de sédiments ont été liés à de

fortes précipitations². Cependant les petites crues et les avalanches ont aussi joué, dans une phase antérieure, un rôle de préparation du bassin versant. Ce rôle de préparation agit sur trois paramètres:

la **disponibilité des sédiments** dans les torrents était suffisamment importante (des petits événements, pas assez «énergétiques»³ pour être exportés hors du bassin versant, ont eu lieu en 2005 et au début de l'été 2006);

les parties supérieures des bassins versants, souvent en zone de pergélisol, ont pu dégeler sur une profondeur légèrement plus grande que les années précédentes, libérant des **sédiments facilement mobiles**;

l'**eau de ruissellement** a pu se retrouver concentrée sur de courtes périodes. En effet, des phases climatiques plus fraîches, couplées avec des précipitations sous formes de neige en altitude, ont alterné avec des phases chaudes et orageuses. L'effet combiné de la fonte de la neige et des orages a permis d'avoir des bassins où les matériaux meubles étaient passablement saturés sur la période.

La phase préparatoire antérieure à l'été 2006

Voici par le menu, ce qui a favorisé la forte prédisposition des bassins versants durant l'été 2006. Tous ces éléments relevant du contexte climatique sont regroupés dans un mémo synthétique en annexe.

En août 2005, réagissant aux pluies qui ont provoqué diverses catastrophes à travers l'Europe, plusieurs bassins versants valaisans ont produit des crues moyennes (**cf. point 1 de l'annexe**). Compte tenu de l'absence de reconnaissances de terrain exhaustives, nous pouvons supposer que cette «pré-cru» a accumulé en maints torrents des sédiments facilement mobilisables. Ce genre de fonctionnement à retardement a déjà été observé lors des grandes intempéries de 1987 (CREALP 1997) et de 2000 (nos propres observations). Ce processus est lié autant au climat antérieur qu'aux processus de recharge sédimentaire typiques des torrents alpins.

Les avalanches de l'hiver et du printemps 2006 (**cf. points 3 et 4 de l'annexe**) ont entraîné l'accumulation d'arbres dans les ravines. Ces accumulations ont été par la suite la cause d'embâcles favorisant la génération d'événements de transfert de sédiments de grande ampleur. En mai, d'importantes quantités de neige tombèrent jus-

NOTES

- Mais pas tous, certains événements ont eu lieu par grand beau temps (par ex. Cassorte, commune d'Hérémence)
- Ce mode de recharge du chenal influence aussi bien les bassins versants pouvant être considérés comme limités par les apports en sédiments (ou l'altération, il correspondrait au Jungschutt Muren dans le sens de STINY, 1910) que ceux limités par la capacité de transport (les sédiments sont toujours là en quantités suffisantes, Altschutt Muren selon STINY, 1910).



FIGURE 1 – A gauche, dépotoir de Miéville le 16 mai 2006, alt. 510, rempli par des dépôts d'avalanches. – PHOTO T. OPIKOFE. A droite, dépôt d'avalanche dans le Chapuisoir (VD) le 13 juillet 2006, alt. 950 m. – PHOTO ERIC BARDOU

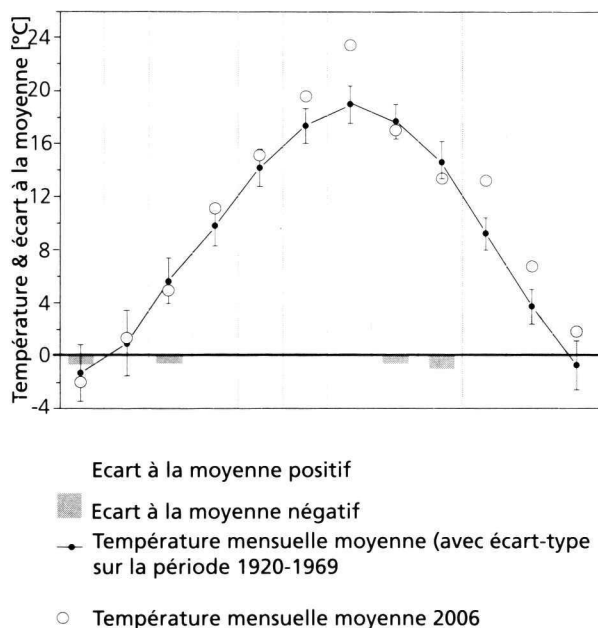


FIGURE 2 – Températures mensuelles de l'année 2006 mises en perspective avec la moyenne des températures de la station de Sion. (Source des données MétéoSuisse). Généralement, la norme utilisée par MétéoSuisse, est prise sur la période 1961-1990, période arbitraire décidée au niveau international. Dans cet article, la norme a été prise sur la période, apparemment stationnaire, allant de 1920 à 1969 à la station de Sion, afin d'identifier l'écart entre l'été 2006 et le climat ayant prévalu au XX^e siècle.

qu'à basse altitude causant de nombreuses avalanches, dont les résidus se sont maintenus jusque tard dans la saison (fig. 1). De l'eau est ainsi stockée dans les bassins versants (cf. point 5 de l'annexe). Ce facteur est reconnu pour favoriser les déclenchements (BARDOU & DELALOYE 2004).

L'été 2006

Dès le début juin, les températures augmentent rapidement (fig. 1 & fig. 2). Elles engendrent une limite de l'isotherme 0°C relativement élevée (cf. points 7 et 8 de l'annexe). La fonte qui, pour la tranche d'altitude inférieure à 2000 m, est plutôt tardive, s'accélère. Finalement, elle précède les dates moyennes observées pour les tranches d'altitudes supérieures (Delaloye, com. pers.). Début juillet, plusieurs épisodes orageux touchent la zone d'étude (cf. points 6, 8 et 9 de l'annexe). Il n'est pas impossible que des sédiments se soient alors accumulés dans les bassins versants; des témoignages relèvent aussi des signes de chutes de pierre avant les violents orages du 25 juillet.

Après cette phase franchement estivale, le mois d'août a été frais (température inférieure à la moyenne (fig. 2) et très arrosé (bien au-dessus des normes mensuelles). Les torrents ont ainsi été purgés des dépôts qui auraient pu s'y accumuler (cf. point 10 de l'annexe).

A la fin de la période d'investigation, de nouvelles journées chaudes agissent sur des bassins versants où le stock d'eau est important, générant encore quelques crues (Lötschental, Matternal).

Mise en perspective de l'année climatique 2006

Bien que l'année 2006 ne fut pas anormalement chaude sur toute la période, comme le montre la figure 2, deux des paramètres des points marquants dans le contexte climatique et dynamique sédimentaire sont néanmoins liés à la température, soit : l'apport de sédiments des zones potentiellement gelées (pergélisol) et la fonte de l'eau tombée sous forme solide. De plus, les crues torrentielles se sont concentrées pendant les phases les plus chaudes (fig. 3), durant lesquelles les températures ont été exceptionnelles, avec :

- un écart de 3 à 4°C par rapport à la moyenne (cf. diagramme en bâton sur la figure 2);
- une déviation supérieure à un écart-type (cf. courbe sur la figure 2).

Face à la problématique liée aux changements climatiques, nous porterons une attention particulière à la température au cours de cette étude. Nous tenons à relever cependant que tous les événements ne peuvent être expliqués que par la combinaison de paramètres.

Répartition des événements

Répartition spatiale

Comme le montre la carte à la figure 3, les événements survenus durant l'été 2006 ont touché quasiment toutes les régions du canton, la partie sud (rive gauche du

Rhône) ayant été la plus concernée au mois de juillet. Les événements de juillet ont également touché d'autres régions : Chablais, Oberland bernois, France voisine⁴. Cela montre non seulement le caractère majeur des événements du mois de juillet 2006 (de par l'étendue de la zone concernée) mais indique aussi la nécessité d'analyser la situation météo-climatique à l'échelle régionale.

Bien que répartis sur toute la zone d'étude, la carte de la **figure 3** montre, que les déclenchements restent circonscrits et qu'ils peuvent être alignés le long d'un axe (deux caractéristiques traduisant la dynamique orageuse). Remarquons aussi qu'à partir du 22 juillet, les événements se déclenchent majoritairement dans le haut des vallées, près des glaciers.

Répartition temporelle

Plusieurs événements ont ainsi causé des dégâts, parfois spectaculaires, caractérisés par un intense transfert de sédiments. A notre connaissance, plus de 63 départs de laves torrentielles (certaines ayant touché plusieurs fois la même ravine) ont pu être répertoriés dans les cantons de Vaud et du Valais (liste probablement non exhaustive). La majorité des événements (soit 30) se sont produit entre

les 22 et 25 juillet (justifiant la classification proposée ci-dessous), 24 se sont déclenchés avant (la chronique débute le 30 avril) et les 9 restants ont eu lieu durant les mois d'août, septembre et octobre.

Outre la violence des orages et le nombre total d'événements, l'année 2006 est marquée par le nombre de départs pouvant être rattachés à une zone de pergélisol (en augmentation au cours de la saison) soit pour :

- la première moitié de juillet à 2 départ sur 8 (25%)
- le 22 juillet à 6 départs sur 10 (60%)
- le 25 juillet à 18 départs sur 21 (86%)
- la fin de l'été à 6⁵ départs sur 9 (66%)

Dans le domaine alpin, la notion de température et de fonte consécutive est liée à l'altitude. Si on ordonne les événements selon l'altitude des zones de déclenchement (**fig. 4**) on s'aperçoit que la moyenne des altitudes passe

NOTE

4 L'événement du Wyssbach à Grindelwald a eu lieu, lui aussi, le 22 juillet. Les orages du 5 et du 7 juillet ont fait des dégâts en Haute-Savoie (Nant Bordon et Thollon) et dans les Préalpes vaudoises (Tinière et Eau-Froide).

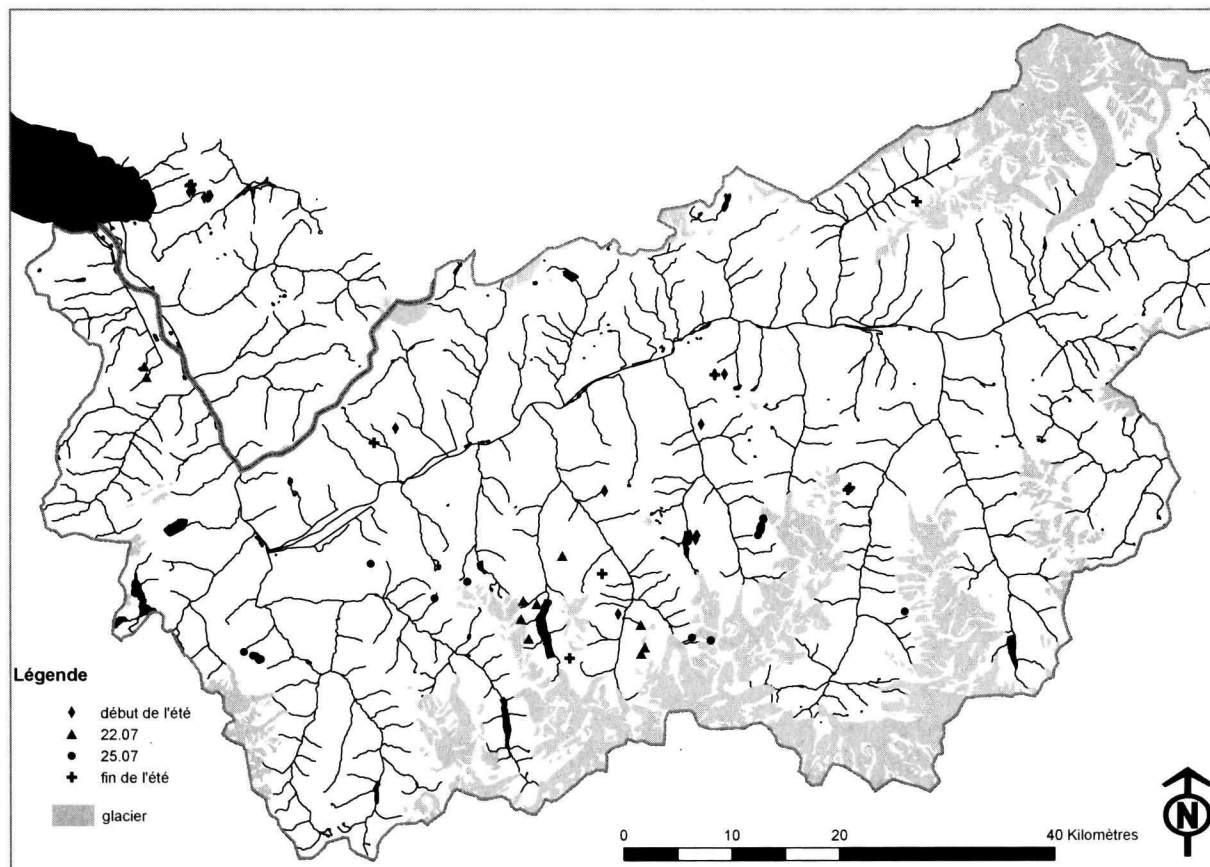


FIGURE 3 – Répartition spatiale des événements.

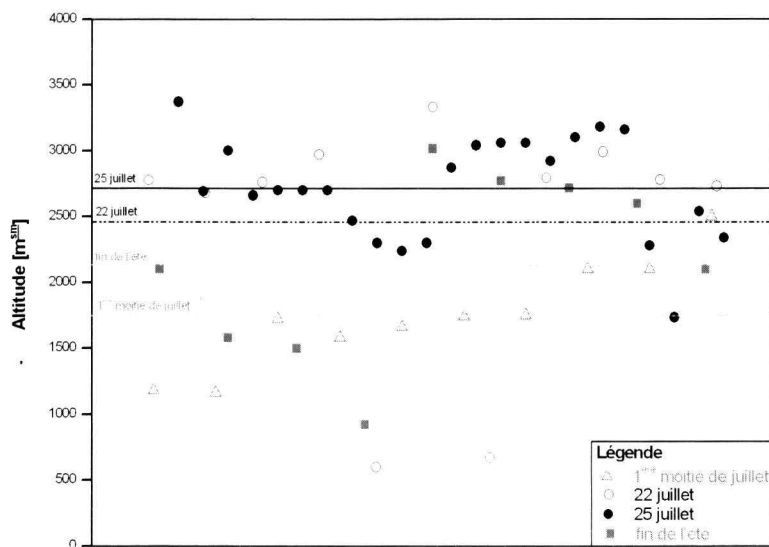


FIGURE 4 – Altitude des départs pour chaque événement et pour les quatre périodes considérées.

de 1750 m pour les événements de la première moitié de juillet, à 2500 m pour l'événement du 22 juillet, puis à 2750 m le 25 juillet. Elle redescend à 2150 m environ pour les événements de la fin de l'été.

Le cas du 22 juillet est exemplaire. Si nous éliminons les 2 départs qui se sont produits à faible altitude dans le Chablais (fig. 3), clairement non liés à des processus de fonte), l'altitude moyenne serait quasiment identique à celle des événements du 25 juillet (fig. 4). Gardons-nous donc des généralisations hâtives !

Analyses

Les mécanismes déjà reportés dans la littérature comme pouvant être responsables du déclenchement de laves torrentielles sont dûs :

- au couple «intensité et durée de la pluie» (par ex. CAINE 1980, CHURCH & MILES 1987, WIECKZOREK 1996, GUZZETTI & al. 2008);
- aux processus géotechniques (changement de la stabilité lors de la saturation du sol, (par ex. ANDERSON & SITAR 1995, CROSTA & DAL NEGRO 2003);
- à la fluidification d'une masse glissée (par ex. FLEMING & al. 1989, BOVIS & JAKOB 2000).

L'étude des événements 2006 offre d'autres paramètres, peut être plus adaptés, à la compréhension des déclenchements en haute-montagne.

Typologie des zones de déclenchements

L'analyse des divers sites de cette étude fait apparaître que l'environnement des zones de déclenchement diffère

d'un événement à l'autre. Cela limite la tentation d'expliquer tous les déclenchements selon une caractéristique unique. Globalement quatre environnement-types de départs ont été reconnus en 2006 dans les Alpes et les Préalpes romandes (fig. 5) :

- en pleine pente, avec de la végétation présente (type 1);
- depuis une zone d'éboulis (type 2);
- depuis une zone périglaciaire (type 3);
- en couloir (type 4).

A noter que, dans le domaine périglaciaire (type 3), quatre événements au moins sont liés de près ou de loin au fonctionnement hydrologique d'un lac proglaciaire. Plusieurs de ces sites sont, du reste, recensés dans l'inventaire des glaciers dangereux de l'Institut de Glaciologie de l'EPFZ (VAW⁶). A relever que les déclenchements qui se sont produits dans des couloirs (type 4) ont pratiquement tous eu lieu en zone de pergélisol potentiel.

La figure 5 répartit les événements de 2006 (retenus dans l'analyse) selon différents environnements des zones de départs. Cette classification permet de distinguer ceux qui, de part leur environnement, peuvent être influencés par la fonte. Pour ces derniers, l'analyse de la relation entre les précipitations et les températures est importante et c'est elle qui fait l'objet de la présente analyse. L'importance du stockage intermédiaire des sédiments, qui joue aussi un rôle important dans l'apparition d'événements majeurs, n'a pas été investigué ici par manque de données.

Exposition

Le jeu des ombres du relief peut influencer localement la température. L'exposition a donc été analysée pour les quatre périodes de l'été 2006. La figure 6 montre que l'orientation de l'exposition évolue durant l'été.

Pendant la première période, la plupart des déclenchements se sont produits sur des pentes nord-ouest. Ensuite, lors des événements du 22 et du 25 juillet la majeure partie des déclenchements a lieu sur des versants ouest (versants exposés au soleil en fin de journée, la période également la plus propice à l'activité orageuse).

NOTES

5 Les événements survenant dans l'Illgraben sont, généralement dès le mois de juillet, liés à la fonte des restes d'avalanches déposés dans le fond du bassin versant (ces dépôts recouverts par les chutes de pierres peuvent être considérés comme du pergélisol). Ils ont été comptabilisés pour les événements survenus après juillet, avec les événements impliquant du pergélisol potentiel.

6 <http://glaciology.ethz.ch/inventar/inventar.html>

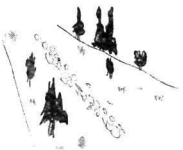

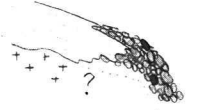
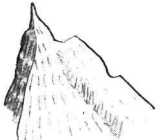
TYPE	NOMBRE DE DÉCLENCHEMENTS	NOMS DES TORRENTS PRINCIPAUX AYANT PRODUIT DES COULÉES EN 2006
	17	Glarey, Itrivoué, Mounire, Pessot, Sarreyer, Vissoie, Tinière, Grand Pré.
	11	Coliore de Méribé, Illgraben, Lui jaune, Merdenson.
	23	Bajin, Barma, Cassorte, Dechenna, Liapay de Grône, Six des Orgues, Marenda, Nicolire, Perrec, Perroc, Péterey, Rotbach, Spisszug, Stampbach, Tortin, Tsiné de la Cretta.
	12	Bondes, Bricola, Blavâ, Clocher Arpette, Rochers du Bouc, Spisszug, Vésivi.

FIGURE 5 – Typologie des zones de déclenchement avec exemples tirés de notre étude.

Enfin, à la fin de l'été, la tendance est moins marquée, mais la majorité des déclenchements a lieu sur des pentes nord.

L'exposition des pentes ayant subi des déclenchements permet de faire deux hypothèses, peut-être complémentaires permettent de relier l'exposition au déclenchement d'événements :

- L'évolution de l'exposition des pentes touchées par des déclenchements au cours de l'été reflète probablement le couplage entre la chaleur, la neige et l'état du pergélisol (passage du secteur ouest à nord) ;
- Moins plausible, mais par souci d'exhaustivité et selon les témoignages, on peut supposer un effet localisé de concentration des pluies par le vent.

La première hypothèse nous permet de supposer qu'au début juillet, les pentes exposées au nord ont encore des dépôts d'avalanches (ce que laisse supposer la Figure 1) ; le sol, proche des torrents, se trouve alors saturé en eau. Les 22 et 25 juillet, les zones périglaciaires subissent les effets conjugués des températures et des précipitations et ce sont majoritairement les flancs ouest qui voient des déclenchements. La température restant élevée à la fin de l'été 2006, c'est alors que les pentes nord voient

leurs zones de pergélisol favoriser la formation de laves torrentielles.

La faible occurrence des pentes sud est peut-être fondée sur leur sous-représentation naturelle en Valais du fait de l'orientation des vallées.

Ces différentes hypothèses ne s'excluent pas les unes des autres, mais demandent à être vérifiées par des analyses similaires portant sur une plus longue période.

Influence de la fonte

Classiquement, en hydrologie, on utilise les degrés-jours pour étudier l'effet de la fonte (par ex. BRAITHWAITE & ZHANG 2000; KAYASTHA & al. 2000; RANGO & MARTINEC 2007). Cette technique se base sur les températures minimales et maximales d'un jour donné, pour reproduire une courbe sinusoïdale sur une période de 24 heures (fig. 7). L'accumulation d'énergie thermique est estimée en calculant l'aire comprise entre la courbe sinusoïdale et le seuil de température retenu (dans ce cas la température de fonte 0°C⁷).

Dans l'approche exploratoire faite dans cette étude, le degré-jour a été calculé à partir des données de la station du Grand-Saint-Bernard, puis additionné pour prendre en compte un effet cumulatif. La figure 8 permet la mise en parallèle du paramètre degré-jour avec la chronique des événements. En d'autre terme la courbe de la figure 8 relie l'évolution de la température (permettant la fonte),

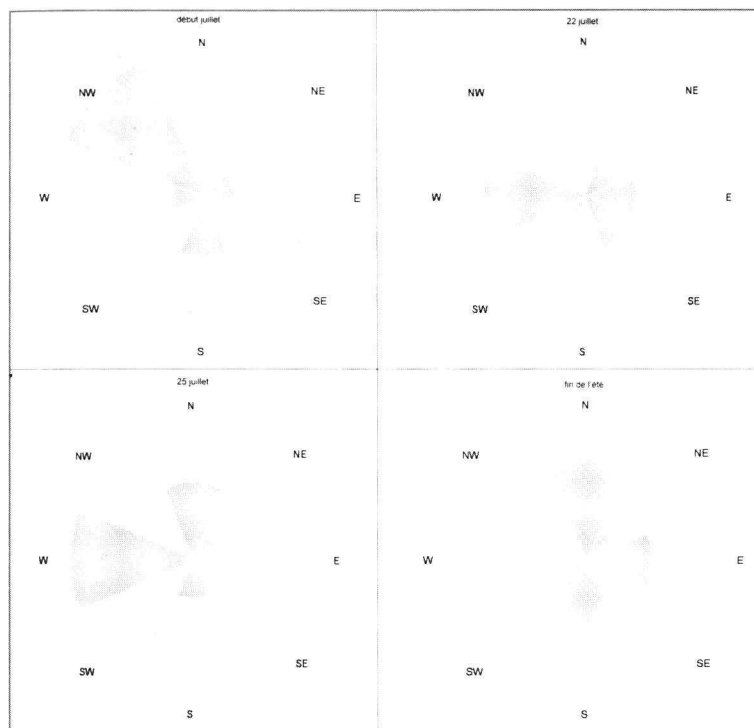


FIGURE 6 – Part relative des différentes expositions des zones de déclenchements durant les quatre périodes définies précédemment.

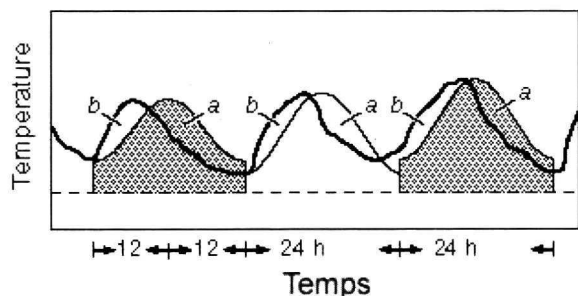


FIGURE 7 – Exemple de calcul des degrés-jours.

avec les processus de déclenchement des laves torrentielles. Sur la **figure 8** la courbe des degrés-jours cumulés peut être subdivisée en trois sections :

- évolution à forte pente qui se termine le 28 juillet (c'est sur cette section qu'ont lieu la plupart des événements);
- section moins raide qui reflète le mois d'août plus frais (avec aucun déclenchement);
- section plus raide (avec, à nouveau, plusieurs événements, dont un au moins, est survenu sans pluie par plein soleil).

En 2006, les événements qui impliquent des zones de pergélisol potentiel (**fig. 8**: cercle vide), ne surviennent qu'à partir du 22 juillet. Durant l'été 2006 c'est lorsque la valeur des degrés-jours du Gd-St-Bernard a atteint environ 471 [°C j], que des déclenchements touchent des zones de pergélisol potentiel. Ce premier résultat, est nuancé par les observations faites les années suivantes

(**fig. 9**). En effet, si en 2007, aucun événement provenant d'une zone de pergélisol potentiel n'a été suffisamment important pour nous avoir été reporté, en 2008, le 1^{er} juillet, cinq événements se sont produits, alors que la valeur des degrés-jours cumulés n'était que d'environ 200 [°C j]. Cela montre que l'élément déclencheur principal reste les pluies intenses, qui peuvent se produire à différents moments de la phase chaude.

Dans une première approche exploratoire, il semble que c'est la pente de la courbe (équivalent à ~10,5 C j/j), qui est comparable (**fig. 9**). Ce paramètre est probablement plus pertinent. Lorsque cette pente est atteinte, au moins pendant quelques jours, la fonte accrue permet soit de saturer les dépôts intermédiaires de sédiments dans la ravine, soit de détacher des sédiments des zones en dégel. Alors des précipitations intenses peuvent facilement déclencher des crues. Toutefois, la base statistique est évidemment trop courte pour fournir des affirmations.

Le maintien de cette pente (45 jours d'affilée en 2006, contre 10 seulement en 2008) peut aussi être un facteur expliquant le nombre d'événements en 2006. L'avenir nous le dira, à condition qu'un monitoring soit effectué pour poursuivre l'analyse.

Conclusions et perspectives

L'étude s'est focalisée sur les déclenchements et non sur les conséquences des laves torrentielles. Ce type d'analyse montre l'importance du contexte global. En ce qui concerne l'été 2006, en effet, la situation météo-climatique régionale antérieure portait déjà en elle les germes d'une situation à risque. L'enchaînement des différents processus, fonte, pluies antécédentes, recharge des réserves hydriques par de la neige, se sont combinés pour former la lame d'eau nécessaire au déclenchement des coulées. Les accumulations de sédiments, dans le réseau hydrographique lors des intempéries d'août 2005 et durant les premiers orages de l'été 2006 ont probablement permis d'augmenter les prédispositions des bassins versants.

NOTE

7 La notion de degré-jour est aussi utilisée pour la prévision des invasions de ravageurs. Le seuil de température peut alors correspondre à des paramètres biologiques (ponte, éclosion de larves, etc.).

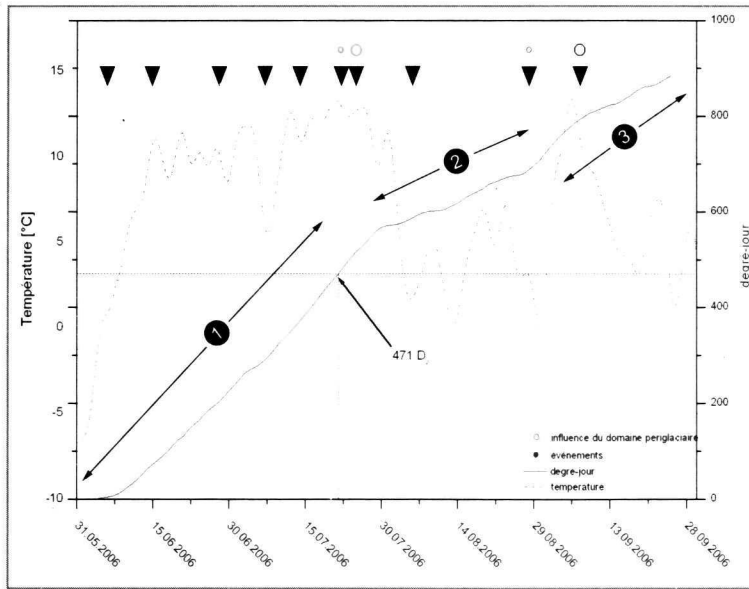
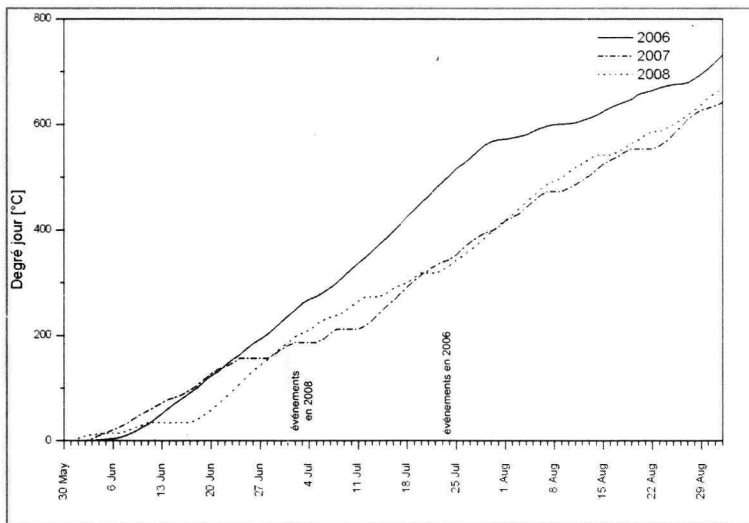


FIGURE 8 – Evolution de la température et des degrés-jours cumulés à la station du Gd-St-Bernard, mis en regard des divers déclenchements, avec indication de l'environnement périglaciaire ou non de la source des coulées. La taille des cercles vides donne l'influence de la zone périglaciaire sur la période considérée.

FIGURE 9 - Evolution comparée des degrés-jours cumulés à la station du Gd-St-Bernard pour les étés 2006, 2007 et 2008.



des zones de déclenchement, souvent liées avec des zones de pergélisol potentiel nous a poussé à explorer des paramètres peu utilisés jusque-là pour la prévision de tels événements, comme les degrés-jours cumulés. Ainsi, dans un environnement de haute-montagne, ce n'est pas toujours là où les précipitations sont le plus intenses que les coulées se forment.

Il est apparu ainsi que l'évolution des températures, ou plus précisément l'allure de la courbe décrivant l'échauffement, pouvait avoir une importance. Ce paramètre décrivant *grosso modo* le couplage chaleur, stock de neige, état du pergélisol a un double intérêt :

- à terme, il sera possible de définir des seuils, permettant de caractériser le niveau de danger d'une période donnée (modulation des effets purement pluviométriques);
- dans la perspective des changements climatiques, l'évolution potentielle des valeurs futures de ces paramètres permettra d'identifier si une tendance à l'augmentation de l'occurrence de ce type de phénomènes existe.

La diversité de ces phénomènes explique le grand étalement des valeurs parmi les paramètres prédictifs observés, comme par exemple l'intensité et la durée des précipitations, même lorsque l'analyse différencie les zones climatiques (GUZZETTI & al. 2008). La distinction des différents environnements de déclenchement permet de sélectionner, pour une crue donnée, les paramètres prédictifs qui seraient les plus significatifs. L'exemple de l'orage du 22 juillet 2006 montre bien que les paramètres prédictifs ne peuvent pas être les mêmes pour les deux coulées survenues dans le Chablais (pas d'effet de fonte dans cet environnement) et celles survenues dans le fond du Val des Dix (enchaînement complexe de processus dans la zone glaciaire et périglaciaire).

Les températures élevées prévalant lors des deux périodes orageuses des 22 et 25 juillet, ainsi que l'altitude

Dans l'immédiat des questions restent ouvertes. Les altitudes relativement élevées des déclenchements observés durant l'été 2006, sont-elles une tendance nouvelle ou sont-elles dues au hasard de l'intensité des pluies? Aura-t-on à l'avenir des événements plus fréquents dans ces zones d'altitudes? Représentent-elles de nouvelles sources de sédiments qui transformeront la dynamique sédimentaire, donc l'équilibre des torrents (BARDOU & JABOYEDOFF 2008)? Les réponses à ces questions touchent aussi bien l'économie (installations hydro-électriques et tourisme) que l'aménagement du territoire, les dangers naturels et *in fine* la protection de l'environnement (apports plus importants de matériaux vers les rivières et mesures prises pour réduire le risque pour la population).

REMERCIEMENTS

Les auteurs tiennent à remercier Dominique Bérod qui a rendu possible une partie de cette étude, François Genolet et Yvette Bardou pour la relecture d'une version préliminaire de ce manuscrit, ainsi que Sylvie Nicoud et Pierre Kunz pour la relecture du manuscrit.

BIBLIOGRAPHIE

- ANDERSON, S.A. & N. SITAR 1995. Analysis of rainfall induced debris-flow. *Journal of Geotechnical Engineering* 121(7): 544-552.
- BARDOU, E. & R. DELALOYE 2004. Possible effects of previous ground freezing and snow avalanche deposits in debris flow activity related to a rainfall event in an alpine environment. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, Volume 4 Issue 4: 519-530.
- BARDOU, E. & M. JABOYEDOFF 2008. Debris flows as a factor of hill-slope evolution controlled by a continuous or a pulse process? In: Gallagher, K., Jones, S. J. Wainwright, J. (eds) *Landscape Evolution: Denudation, Climate and Tectonics Over Different Time and Space Scales. Geological Society, London, Special Publications*, 296: 63-78.
- BOVIS, M. J. & M. JAKOB 2000. The July 29, 1998, debris flow and landslide dam at Capricorn Creek, Mount Meager Volcanic Complex, southern Coast Mountains, British Columbia. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 37: 1321-1334.
- BRAITHWAITE, R. J. & Y. ZHANG 2000. Sensitivity of mass balance of five Swiss glaciers to temperature changes assessed by tuning a degree-day model. *Journal of Glaciology*, Volume 46, Number 152, pp. 7-14(8).
- CAINE, N. 1980. The rainfall intensity-duration control of shallow landslides and debris flows. *Geografiska Annaler*, Volume 62A issue 1-2, pp. 23-27.
- CHURCH, M. & M.J. MILES 1987. Meteorological antecedents to debris flow in southwestern British Columbia. In: G.F. Wieczorek and J.E. Costa (Editors), *Debris flow & avalanche: process recognition and mitigation*, Reviews in engineering geology. *Geological Society of America, Boulder*, pp. 63-79.
- CROSTA, G. & P. DAL NEGRO 2003. Observations and modelling of soil slip-debris flow initiation processes in pyroclastic deposit: the Sarno 1998 event. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, volume 3, pp. 53-69.
- CREALP 1997. *Intempéries du 24 juillet 1996 dans le secteur Ferret/Chamonix: analyse globale de l'événement* (non publié).
- FLEMING, R.W., S.D. ELLEN & A.A. MITCHELL 1989. Transformation of dilative and contractive landslide debris into debris flows, an example from Marin county, California. *Engineering Geology*, 27: 201-223.
- GUZZETTI, F., S. PERUCCACCI, M. ROSSI & C.P. STARK 2008. The rainfall intensity-duration control of shallow landslides and debris flows: an update. *Landslides* volume 5, pp. 3-17.
- KAYASTHA, R. B., Y. TAKEUCHI, M. NAKAWO & Y. AGETA 2000. Practical prediction of ice melting beneath various thickness of debris cover on Khumbu Glacier, Nepal, using a positive degree-day factor. In *Debris-covered Glaciers*. Eds Fountain, A., Nakao M, Raymond C. F. IAHS.
- RANGO, A. & J. MARTINEC 2007. Revisiting the degree-day method for snowmelt computations. *Journal of the American Water Resources Association* Volume 31 Issue 4, pp. 657 - 669.
- STINY, J. 1910. *Die Muren, Versuch einer Monographie mit besonderer Berücksichtigung der Verhältnisse in den Tiroler Alpen*. Innsbruck, Verlag der Wagnerschen Universitäts-Buchhandlung. Réimpression Université d'Innsbruck.
- WIECZOREK, G. F. 1996. Landslides triggering mechanisms, in: *Landslides: Investigation and Mitigation*, edited by: Turner, A. K. and Schuster, R. L., *National Research Council, Transportation Research Board, Washington*, pp. 76-90.

ANNEXE

Contexte climatique de l'année 2006

1. Le premier «acte» s'est déroulé durant les intempéries d'août 2005. Durant cette période (20-22 août) le sud-ouest de la Suisse a été moins arrosé que le nord des Alpes, mais des précipitations de fréquence décennale y ont été enregistrées en plusieurs endroits. Plusieurs bassins versants ont subi des déplacements importants de sédiments (Merdenson de Vollèges, torrent de Lourtier, Coliore de Méribé, etc.). Ces mouvements ont, selon toute vraisemblance, concernés plusieurs autres bassins versants (ou du moins leur partie supérieure) sans que cela ne soit remarqué.
2. Globalement l'hiver 2005/2006 a été légèrement plus froid que la norme et légèrement déficitaire en précipitations.
3. Début mars 2006, à la suite du passage de la tempête Xandra, une série de fronts alterne sur le Valais apportant d'importantes chutes de neige (entre 60 et 100 cm). Les vents et le cumul de neige sur trois jours furent particulièrement importants en Bas-Valais, engendrant de nombreuses avalanches. Les températures relativement élevées rendent la neige lourde et les forêts ont connu des dégâts notables en basse altitude. A la fin mars un afflux d'air tropical fait grimper rapidement les températures. Suite à la fonte occasionnée par ce réchauffement, on a pu voir dans le Merdenson de Vollèges une lave torrentielle s'écouler par plein soleil (26 mars).
4. Début avril, une situation similaire à celle prévalant durant la tempête Xandra se produit. Par deux fois, du 4 au 12 avril, il tombe une importante quantité de neige jusqu'en basse altitude (ces précipitations engendrent des inondations sur le plateau suisse et un événement de transport solide intense à St-Gingolph). Le printemps 2006 a vu le Valais recevoir 150 à 200 % de plus de précipitations par rapport à la norme (1961-1990).
5. Au mois de mai, des chutes de neiges tardives se produisent jusqu'à des altitudes relativement basses. Ces conditions engendrent à nouveau une activité avalancheuse importante. Des avalanches atteignent la vallée du Rhône (dépotoir de Miéville). Une telle situation peut être qualifiée par une fréquence vingtennale. Des dépôts d'avalanches tapissent encore les lits des torrents en juillet.
6. Les premiers orages touchent le Valais le 16 mai. Le lendemain, le Rhône charrie beaucoup de limons et d'arbres (probablement un effet amplifié par les avalanches). Le 18 mai une vague orageuse plus importante touche le Canton (déclenchant plusieurs coulées dans l'Illgraben).
7. Début juin voit arriver les premières journées «tropicales» (soit les journées où la température dépasse 30°C). A partir du 19 juin, suite à une belle période chaude et sèche, une vague d'orages est observée sur la Suisse, en parallèle avec une hausse marquée des températures. L'ensoleillement du mois de juin a été aussi généreux (par exemple le plus fort taux d'ensoleillement au Gd-St-Bernard depuis le début des mesures en 1934).
8. Juillet 2006 s'annonça chaud, les températures dépassant en plusieurs endroits celle de juin 2003. La disparition de la neige, qui a été tardive dans la tranche d'altitude 2'000-2500 m, a finalement été précoce au-dessus de 2700 m, avec une fonte massive de ce début d'été (Delaloye, comm. pers). Le 5 juillet, une zone dépressionnaire arrive de l'ouest provoquant des précipitations importantes et des rafales de vent soutenues. A la suite de cette dépression, une série d'orages surviennent (5 et 7 juillet) faisant reculer nettement les températures pour quelques jours. Le 10 juillet, elles retrouvent un niveau identique à celui du début du mois. Le 11 juillet une coulée issue du glacier Vadret da l'Alp Ota (Grisons) emporte une touriste.



9. Mi-juillet 2006 la répartition des pressions sur l'Europe se modifie pour faire place à un flux de sud-ouest apportant de l'air chaud et humide en provenance d'Espagne. Plusieurs orages ont eu lieu durant cette période, dont celui du 22 juillet qui déclenche plusieurs coulées (Collombey-Muraz, Val des Dix, Oberland). Dès le 23 juillet, la répartition des pressions à l'échelle du continent s'uniformise (marais barométrique) engendrant une situation fortement orageuse. Ces orages ont souvent été stationnaires provoquant de forts cumuls de précipitations le 25 juillet (Les Dranses, Val d'Anniviers, etc.). Du 25 au 27 juillet, la température moyenne atteint 35°C. Pour le Valais, la moyenne mensuelle de température a été de l'ordre de 4°C supérieure à la norme. A Sion, depuis 1864, seul le mois de juillet 1928 fut plus chaud.
10. Le début du mois d'août prend le contre-pied de juillet, la neige atteignant même les grands cols alpins. Dès la moitié du mois, un courant de sud-ouest s'installe en apportant de fortes précipitations sur les Alpes. Dans le Chablais et les Préalpes vaudoises les précipitations atteignent 160-240% de la norme (seconde crue importante de l'été dans la Tinière, Villeneuve). Ces cumuls ont probablement joué dans l'activation du glissement d'Itrivoué qui apporte d'importantes quantités de matériaux à la Losentse. A la fin du mois les températures sont à nouveau élevées.
11. Début septembre 2006, la limite du zéro degré est toujours situé à 4700 m. Ces températures élevées associées aux chutes de neige du mois précédent aboutissent au déclenchement de nouvelles coulées (Spisszug, St-Niklaus), dont une qui se produit par temps ensoleillé (Cassorte, Hérémence). Les 17-18 septembre une situation similaire à celle d'août 2005 apparaît (quoique avec une dépression sensiblement moins creusée). D'importantes précipitations touchent la Suisse (troisième crue importante sur la Tinière) et également le Valais. Les températures continuent à être supérieures à la moyenne (de 2 à 3°C) tout au long du mois.
12. Les mois d'octobre et de novembre 2006 continuent à être anormalement chauds.